



**REVISIÓN SOBRE EL ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE LOS  
MICROORGANISMOS PRESENTES EN EL COMPOSTAJE DE  
SUBPRODUCTOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR.**

**Magda Estefanía Pachón Arcila**

**Anlle Daniela Vargas Muñoz**

**Universidad Libre Seccional Pereira**

**Facultad de Ciencias de la Salud, Microbiología**

**Pereira, Risaralda**

**2015**



**REVISIÓN SOBRE DEL ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE LOS  
MICROORGANISMOS PRESENTES EN EL COMPOSTAJE DE  
SUBPRODUCTOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR.**

**Magda Estefanía Pachón Arcila**

**Anlle Daniela Vargas Muñoz**

**DOCENTE ASESOR: Rodolfo López Franco**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN MICROBIOTEC**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE BIOTECNOLOGÍA**

**Universidad Libre Seccional Pereira**

**Facultad de Ciencias de la Salud, Microbiología**

**Pereira, Risaralda**

**2015**

## **RESUMEN.**

Para muchos autores, el suelo es un ambiente complejo y dinámico en el cual la actividad biológica está en mayor medida dominada por la actividad de los microorganismos, es entonces cuando se comprende lo fundamental que es la diversidad microbiana en el funcionamiento del ecosistema. Estos organismos microscópicos son los causantes de los grandes procesos físico-químicos que suceden a nuestro alrededor como la descomposición, los ciclos de nutrientes, la agregación del suelo, el antagonismo y la propia patogenicidad. En la agricultura y en sí en campos afines a la misma, los estudios de los microorganismos y su relación con el sistema suelo-planta, permiten generar lo que se denomina uso sostenible del propio suelo.

Los centrales azucareros son grandes contaminadores por la gran cantidad de desechos generados en el proceso agroindustrial, estos residuos pueden revalorizarse transformándose en materiales orgánicos con la ayuda del desarrollo de tecnologías y el aporte de microorganismos para que estos procesos degradativos sean aprovechados por las diversas actividades del ser humano.

El compostaje es una alternativa a la problemática de contaminación de los desechos orgánicos que se generan en la industria del azúcar, pero se manejan desconociendo la dinámica microbiana presente en el proceso.

De acuerdo a lo anterior, el propósito de esta revisión es brindar una información que permita comprender algunas de las interacciones entre los diferentes microorganismos en el proceso de compostaje de subproductos de la caña de azúcar, para así ser complementado con un proyecto de investigación el cual sirva para la evaluación de la dinámica entre estos microorganismos y comprender los factores que regulan la actividad de las poblaciones microbianas en el proceso de compostaje, en procura de proponer mejoras para el proceso, que ayuden a la calidad, la velocidad de degradación y la madurez del producto.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El ambiente se considera contaminado cuando cambia la condición atentando así contra la población y el desarrollo de actividades, supervivencia de otros organismos manifestándose en pérdida de la biodiversidad e inhibición de sistemas productivos y en general de la degradación de calidad de vida(1).

La industria azucarera es quizás una de las más grandes generadoras de desechos orgánicos en nuestro país; representando la generación de más del 3.5% del PIB agrícola(2). De los procesos de elaboración del azúcar y la panela, se obtienen muchos residuos que a su vez pueden ser reutilizados en procesos biotecnológicos como por ejemplo el bagazo que tras ser obtenido en el proceso de molienda de la caña es usado como combustible de las propias máquinas después de ser sometido a un proceso de secado. Al igual que el bagazo, otros residuos también son obtenidos dentro de los procesos de elaboración de los productos de la caña de azúcar (*Saccharum* sp.) como la cachaza, obtenida luego del proceso de clarificación. Este residuo suele ser considerado como un gran contaminante del suelo si no es sometido a un debido proceso de descomposición; sin embargo, estudios realizados a este residuo, han demostrado que sus propiedades físico-químicas generan varios beneficios a partir de los componentes químicos extraídos de la misma y que con un buen uso pueden llegar a pasar de ser residuos a la solución de grandes problemas como por ejemplo, la biorremediación de las zonas en las que se presentan derramamientos de hidrocarburos(3).

El compostaje es una alternativa a la problemática de desechos que se generan en las industrias azucareras pero se manejan desconociendo su dinámica microbiana presente allí se omiten microorganismos responsables de la degradación de los desechos orgánicos y por ello factores físico-químicos que favorecen su actividad(2)

Son diversos los autores (Filippini(4), De Baca (1956)(5), Yágodin *et al.* (1986)(5) Crespo (1997)(5), Leal y Madrid (1998)(5)) que reportan la importancia de los microorganismos en los procesos de descomposición de la materia orgánica, mediante una serie de fenómenos físico-químicos, que terminan convirtiendo aquellas partículas en energía, que posteriormente será utilizada en la producción de nuevas células.

Durante el proceso de compostaje, diferentes microorganismos desempeñan un gran papel estando presentes en cada uno de los ciclos por los cuales la materia orgánica se transforma en abono, donde los microorganismos patógenos suelen preferir temperaturas por debajo de los 42°C, aunque existen los microorganismos termotolerantes, posibles de encontrarse a lo largo de todo el proceso (microorganismos extremófilos). Muchos autores (Sánchez (2009)(6), Naranjo (2013)(7), Doncean *et al.* (2011)(8), Escobar *et al.* (2012)(9), Uribe *et al.* (2001) etc.) han escrito cerca de qué microorganismos existen o intervienen dentro del proceso de compostaje; sin embargo, sólo unos cuantos se han dedicado a estudiar cómo es la interacción de estos dentro de cada una de las fases del proceso. Petric y Mustafic (2013) (10) propusieron un modelo matemático mediante el cual encontraron cinco variables que alteran positivamente el crecimiento microbiano dentro del compostaje del estiércol de aves de corral y el trigo, siendo estas variables la conversión de la materia orgánica, la

concentración de O<sub>2</sub>, la concentración de CO<sub>2</sub>, la temperatura del sustrato y el contenido de humedad.

Para evaluar el compostaje de subproductos de caña de azúcar, Sánchez (2009) (6) realizó el estudio donde caracterizó los microorganismos presentes en dicho compostaje; la caracterización la llevó a cabo mediante una serie de muestreos al azar por tres etapas, luego trasladó las muestras al laboratorio y realizó siembras a profundidad y masivas para el crecimiento de hongos y bacterias.

Debe tenerse en cuenta que en la Planta de Compostaje, del Ingenio Risaralda S.A., ubicado en el municipio de La Virginia, se procesan los subproductos de la caña de azúcar, para obtener de ellos material compostado listo para su utilización en la agricultura; las vinazas que se aplican en el proceso de compostaje, pueden contener una concentración promedio de 0,52% p/p en nitrógeno total, lo que puede ser causante de contaminación odorífera, entre otras sustancias que se generan en el proceso, producto de la descomposición de la materia orgánica(11).

Por tal motivo, la pregunta del presente trabajo apunta a ¿Qué estudios están reportados para la evaluación de la dinámica de los microorganismos presentes en el compostaje de subproductos de la caña de azúcar?

## **JUSTIFICACIÓN**

La industria azucarera, es considerada como una de las industrias que más genera desechos a nivel global, es por ello que la necesidad de implementar nuevas tecnologías amigables con el medio ambiente no se ha hecho esperar. Por tanto, algunos de los Ingenios han decidido emplear aquellos residuos obtenidos en el proceso para generar elementos que puedan ser biosostenibles como el bagazo y la vinaza que tras ser recolectados, son transportados a otra sección para elaborar biocombustibles que al final terminan siendo el sustento de las propias máquinas de trabajo en la fábrica. Otro de los residuos que más se generan en la producción del azúcar a través de la caña, es la cachaza, un elemento que es obtenido en grandes cantidades tras la clarificación del zumo de la caña de azúcar. A partir de la cachaza puede obtenerse abono orgánico, siempre y cuando se someta a las condiciones necesarias para el desarrollo y descomposición de la materia que le compone. El compost que se obtiene de este residuo según algunos estudios es bastante eficiente, el problema yace en que al ser un material con demasiada humedad se retrasa un poco más el proceso además de que genera ciertos olores que pueden ser molestos para la población aledaña. En vista de la notoria problemática generada alrededor de la producción de este tipo de abonos, la necesidad de buscar métodos de acortamiento en los tiempos y el control de olores se ha hecho indispensable así que como paso inicial de una serie de estudios, el primero es la valoración acerca de cómo se comportan los microorganismos en este proceso de degradación de materia es decir, la dinámica que llevan en cada fase del proceso.

La mayor parte de los microorganismos (bacteria, actinomicetos y hongos) son seres unicelulares muy simples en su estructura y composición. La base y la forma de

alimentación son peculiares de cada colonia específica pero sus necesidades energéticas, de nutrientes orgánicos o minerales, agua, temperatura y ausencia de elementos o condiciones nocivas, son similares las plantas con las que comparten el hábitat. En ecosistema con buen nivel de biodiversidad se establecen relaciones simbióticas entre las diferentes poblaciones microbianas, en un equilibrio dinámico en el que cada cual encuentra su espacio propio y suele convivir en estrecha relación con el resto. Eventuales desequilibrios del ecosistema pueden estimular mayores proliferaciones de unas determinadas colonias en detrimento de otras(7), por lo que se requiere el estudio de sus múltiples formas y desempeños biológicos.

## **OBJETIVO.**

Identificar la información reportada para la evaluación de la dinámica de los microorganismos presentes, en el proceso de compostaje de subproductos de la caña de azúcar, con el propósito de generar un proyecto de investigación para la Planta de Compostaje del Ingenio Risaralda SA.

## **METODOLOGÍA.**

El Tipo de Estudio del presente Trabajo, se considera Descriptivo Analítico, en la medida que permite interpretar los reportes científicos consultados, para la generación de un proyecto de investigación.

Para realizar el presente estudio se procedió a la búsqueda en diferentes fuentes de la información, sobre los reportes bibliográficos existentes para residuos orgánicos, el compostaje y su marco legal; para microorganismos participantes en procesos de compostaje; y para métodos de análisis en la evaluación de la dinámica de los microorganismos participantes. Por tanto, para la mejor comprensión y utilización de la literatura encontrada, se dividió en tres capítulos que permitieron visualizarla, a saber:

1. Residuos orgánicos y compostaje
2. Microorganismos presentes en procesos de compostaje.
3. Métodos para evaluar la dinámica de MOs en procesos de compostaje.

La información tomada de manera predilecta fue aquella otorgada por las bases de datos vía internet más conocidas entre ellas las bases latinoamericanas SciELO y Redalyc, dos bases de datos especializadas en temas de ciencia y tecnología. SciELO es una iniciativa de FAPESP (Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de São Paulo) y de BIREME (Centro Latinoamericano y del Caribe de Información en Ciencias de la Salud) que desde el año 2002 ha buscado la manera de mantener a la vanguardia el desarrollo de metodologías de búsqueda, preparación, almacenamiento, disseminación y evaluación de la literatura científica en formato electrónico. Para la búsqueda en esta base de datos se implementaron varios filtros, el primero fue la introducción de la consulta utilizando las palabras “Residuos orgánicos y compostaje” siendo el conector el “y”. En esta búsqueda se arrojaron 1550 resultados, así que para hacer la búsqueda más específica se le agregó una nueva palabra “y caña de azúcar”, una vez entrada la búsqueda los resultados se vieron notablemente disminuidos a 222. Sin embargo, seguía siendo una cantidad demasiado alta así que se le

añadió un nuevo filtro “y/o cachaza” obteniendo entonces una reducción a 48 resultados. De estos 48 resultados se tomaron 10 artículos que hablaban de manera específica de compostaje elaborado con subproductos de caña de azúcar y 4 eran específicamente relacionados con cachaza.

Redalyc, es la Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal creada por la Universidad Autónoma del Estado de México. Es una de las bases de datos más utilizadas en la búsqueda de material bibliográfico relacionado con las ciencias a fines a las de la tierra y la biotecnología. Para la búsqueda dentro de esta base de datos se ingresó la palabra clave “compost y caña de azúcar” arrojando 60934 resultados que por obvias razones debía ser reducido para facilitar la búsqueda. Se aplicó un segundo filtro usando como nueva palabra de búsqueda “compostaje de subproductos de caña de azúcar” que arrojó 8855 documentos. De esta base de datos se tomaron sólo 8 documentos.

ScienceDirect es una de las bases más utilizadas a nivel mundial por la calidad de documentos que suelen encontrarse allí; para la búsqueda en esta base se utilizaron los operadores booleanos “AND”. La primera búsqueda se realizó con las palabras “organic waste and compost” encontrando 15946 resultados, el segundo filtro fue la adición de las palabras “and sugar cane” hallando 815 resultados. Finalmente se añadió un tercer filtro con las palabras “and cachaza” arrojando 9 resultados de los cuales se tomaron 4. También se hizo una segunda búsqueda en esta base de datos con el fin de encontrar documentos que proporcionaran indicios o respaldaran estudios acerca de la dinámica de los microorganismos en compostaje así que empleando el comando de búsqueda “sugar cane and compost and microorganisms dynamic” se encontraron 163 resultados de los cuales sólo 4 eran de total interés.

Para la búsqueda de las Normas Técnicas y demás documentos legales, se implementó como base de búsqueda la base del ICONTEC, la cual permite ver los documentos online pero no descargarlos. Se eligieron los sectores:

- Medio Ambiente. Protección de la Salud. Seguridad.
- Agricultura.

Finalmente se utilizó Google Académico para realizar la búsqueda de documentos que pudieran complementar los estudios así que tras ingresar la consulta se encontraron 1140 resultados, después de colocar el segundo filtro anteriormente mencionado se redujo la búsqueda a 236, de los cuales se tomaron varios documentos, entre ellos trabajos de grado y artículos.

**TABLA 1.** Cantidad de datos arrojados en la búsqueda de la bibliografía en las bases de datos.

<b>NOMBRE DE LA BASE DE DATOS</b>	<b>OPERADOR BOOLEANO UTILIZADO</b>	<b>NÚMERO DE CONCORDANCIAS POR BASES DE DATOS</b>
SciELO	Y	1550
SciELO	Y/O	48

Redalyc	Y	60934
Redalyc	Y/O	8855
Science Direct	AND	15946
Science Direct	OR	163
Google Académico	Y	1140
Google Académico	Y/O	236

## MARCO TEÓRICO.

### 1. Residuos orgánicos.

#### 1.1 Antecedentes.

Se considera que el ambiente está contaminado cuando se cambia su condición natural, atentando así contra la población biológica; el desarrollo de actividades y supervivencia de los organismos puede manifestar pérdida de la biodiversidad con degradación de la calidad de vida. La agricultura orgánica no es algo nuevo, siempre ha existido y es la única manera de conservar el ciclo natural que existe en el mundo. El uso indiscriminado de los recursos en los últimos años ha generado preocupación en gobiernos y empresas, colocando así al ambiente en un contexto de protección hacia la ecología del planeta. Así, el suelo es un recurso natural renovable, con capacidad de regenerarse, gracias a la participación de los microorganismos que ayudan en la descomposición de los residuos orgánicos, porque mejoran las propiedades físico-químicas de los suelos(5).

#### 1.2 Problemática de los residuos orgánicos: Olores y demás.

El crecimiento continuo de la población mundial influye en el aumento de las actividades productivas de las cuales se genera inevitablemente un aumento del volumen de desechos sólidos, líquidos y gaseosos que conlleva una serie de implicaciones relacionadas con aspectos de salubridad y medioambientales(5), que son objeto de preocupación para las investigaciones en materia de ecología y medioambiente y que aglutinan gran parte de los esfuerzos de los proyectos relacionados con el desarrollo sostenible(1). Estas características cuanti-cualitativas dependen de la materia prima, de los procesos de industrialización, de la intensidad de la producción y de los productos obtenidos. Algunas fuentes contaminantes como las de la industria azucarera, se pueden clasificar, según su procedencia, de acuerdo al Instituto de Derivados de la Caña de Azúcar de La Habana Cuba(1) así:

- **Mostos o vinazas de residuos alcohólicos:** Principal residuo líquido de la fermentación de la melaza por cada litro de alcohol se generan 13 litros de vinaza. Los constituyentes inorgánicos son sulfatos, cloruros, fosfatos, potasio, sodio y silicato. Los constituyentes orgánicos son las proteínas y otras sustancias, ácidos orgánicos, alcohol, glicerol y azúcares(1).
- **Cachaza o torta de filtro:** Físicamente la cachaza es un residuo esponjoso, amorfo, de color oscuro a negro, que absorbe grandes cantidades de agua. Es el principal residuo de la industria del azúcar de caña, produciéndose de 30 a 50 kg por tonelada de materia prima procesada, lo cual representa entre 3 y 5 % de la caña molida. Este



porcentaje y su composición varían con las características agroecológicas de la zona con el cultivo cosechado, eficiencia de fábrica y método de clarificación empleado, entre otros factores. La cachaza se produce durante la clarificación que se hace al jugo de caña; se recoge a la salida de los filtros al vacío, representando aproximadamente un 25 % de materia seca(1, 12).

**TABLA 2.** Composición de la cachaza, características físico-químicas. **Adaptada de: CIBE, 2010**  
(Disponible en: <http://www.cibe-europe.eu/Home.aspx>)

<b>COMPOSICIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LA CACHAZA</b>	
<b>COMPONENTE</b>	<b>PORCENTAJE (%)</b>
Humedad	86,751
Cenizas	2,739
M. Orgánica	10,51

- **Bagazo:** Residuo del tallo o cuerpo de la caña de azúcar que queda después de la extracción del jugo. Presenta baja densidad y alto contenido de humedad en las condiciones que se obtiene del proceso de molienda de caña. El bagazo fresco y húmedo apilado a la intemperie produce un residuo de jugo que es susceptible de ser fermentado por levaduras, la temperatura favorece el crecimiento de muchas especies de hongos, principalmente actinomicetos termo y mesófilos(1, 12).
- **Residuo de la cosecha:** La planta de la caña de azúcar en su estado natural se compone de cogollo y hojas verdes (8 %), vaina y hojas secas (20 %) y tallos limpios (72 %). Por cada 100 toneladas de azúcares totales que llegan a la planta, quedan dispersas en el campo 134 toneladas de residuos agrícolas, los cuales afectan a la productividad de los cañaverales (13).

### 1.3 Legalidad.

Según la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 14010, se define auditoría ambiental como el “proceso de verificación sistemático y documentado para obtener y evaluar en forma objetiva la evidencia que permita determinar si las actividades ambientales, los eventos, las condiciones, los sistemas administrativos especificados, o la información acerca de estos temas cumplen los criterios de la auditoria, para comunicar los resultados de este proceso a la organización(14). El Decreto 1713 de 2002 hace referencia a que un residuo sólido o desecho es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales de servicios que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de

aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. Los residuos sólidos se dividen en aprovechables y no aprovechables. Igualmente se consideran sólidos aquellos provenientes del barrido de áreas públicas (15).

Según la Resolución 1341/2013 del Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, se entiende por olor a las propiedades organolépticas perceptibles por el órgano olfativo cuando inspira determinadas sustancias volátiles y olor ofensivo, al generado por actividades industriales, comerciales o de servicio, que producen malestar aunque no cause daño a la salud humana. Adicional a esto en el capítulo 4 del documento “PROTOCOLO PARA EL MONITOREO, CONTROL Y VIGILANCIA DE OLORES OFENSIVOS” se menciona que en el compostaje de sistemas abiertos, es importante considerar la localización, el manejo que incluye, el tipo de materiales a partir de los cuales se hace el compost, el método de compostaje y un adecuado balance de la relación C/N; además se tiene en cuenta la frecuencia de volteo, las condiciones meteorológicas (dirección del viento) cuando se hace el volteo y evitar las condiciones de anaerobiosis.

### **1.3.1 Sistema Nacional Ambiental en Colombia.**

Erazo (2014) (16) reporta en su trabajo que la guía ambiental para el subsector de caña de azúcar, en su versión final, emitido por ASOCAÑA y revisado por el Ministerio del medio ambiente, se ha convertido en una herramienta ágil que incide en el mejoramiento de la planeación y gestión ambiental de los productores de azúcar de caña, al tiempo que se constituye en un instrumento de apoyo para el control por parte de las autoridades ambientales competentes. Continúa diciendo que según ASOCAÑA, “el sector azucarero colombiano, desde los años 70’s, ha venido trabajando en forma concertada con las autoridades ambientales, en actividades de control y mejoramiento ambiental. El concepto de sostenibilidad, resalta la importancia de mirar cualquier actividad productiva a largo plazo. El crecimiento de hoy no debe hacerse a costa del crecimiento del futuro y esto es válido en un negocio como el azucarero donde la rentabilidad es a largo plazo. Para lograr resultados económicos y efectivos en el manejo ambiental se impone la autoevaluación dentro de un mejoramiento continuo. Cumplir la norma hoy, no es suficiente para mejorar las condiciones de los recursos naturales. La optimización continúa en el uso del agua para riego, la regulación y las alternativas a las quemas de caña, el control biológico de plagas, variedades resistentes, el manejo racional de los agroquímicos, que incluye la aplicación de maduradores y fertilizantes, la optimización en los consumos de agua en fábrica, el control de las emisiones atmosféricas de las chimeneas y utilización de subproductos; son algunas actividades realizadas por el sector. Otro ámbito de trabajo importante es lo relacionado con la conservación de las fuentes de aguas o cuencas hidrográficas, donde se trabaja en la participación comunitaria, la educación ambiental y los sistemas de producción sostenibles.

El sector azucarero colombiano en noviembre de 1996 firmó el convenio de concertación para una producción limpia con el Ministerio del Medio Ambiente, las Corporaciones Autónomas Regionales de Cauca, Valle del Cauca y Risaralda y la Sociedad Civil representada por la Comunidad de Palmira. Posteriormente, adhirió la Corporación Autónoma Regional de Caldas. Este ha sido uno de los logros más importantes dentro del campo ambiental para este sector y está orientado a lograr las presiones sobre el medio ambiente aplicando las mejores prácticas ambientales y la eco – eficiencia. Como parte de

este proceso, el Ministerio y la Sociedad de Agricultores de Colombia (SAC) suscribieron un convenio de cooperación con el objeto de elaborar un conjunto de guías ambientales para diversos subsectores agropecuarios, en el marco de “Política Ambiental Nacional de Producción Más Limpia”. Los objetivos primordiales de la Guía Ambiental para el subsector de Caña de Azúcar son:

- Presentar una descripción de los procesos involucrados en la actividad azucarera.
- Conocer los aspectos e impactos ambientales para cada parte del proceso productivo.
- Presentar medidas típicas para control y prevención de los impactos ambientales generados por la actividad.
- Unificar criterios para la gestión ambiental del subsector.
- Difundir la legislación ambiental entre los productores para facilitar su cumplimiento.
- Proponer opciones tecnológicas orientadas hacia la producción más limpia.
- Facilitar la gestión de las autoridades ambientales.

Según Erazo (20014) (16), la agroindustria azucarera en los pasados 18 años invirtió más de \$220.000 millones en el área ambiental, lo cual se ha reflejado en menores niveles de contaminación por unidad de producción y que entre uno de las actividades más representativas se encuentra la Reducción de la carga orgánica contaminante medida en términos de DBO 5, pasando de 15,3 kilogramos por tonelada de azúcar producida a menos de 2 kilogramos por tonelada de azúcar producida en el año 2000.

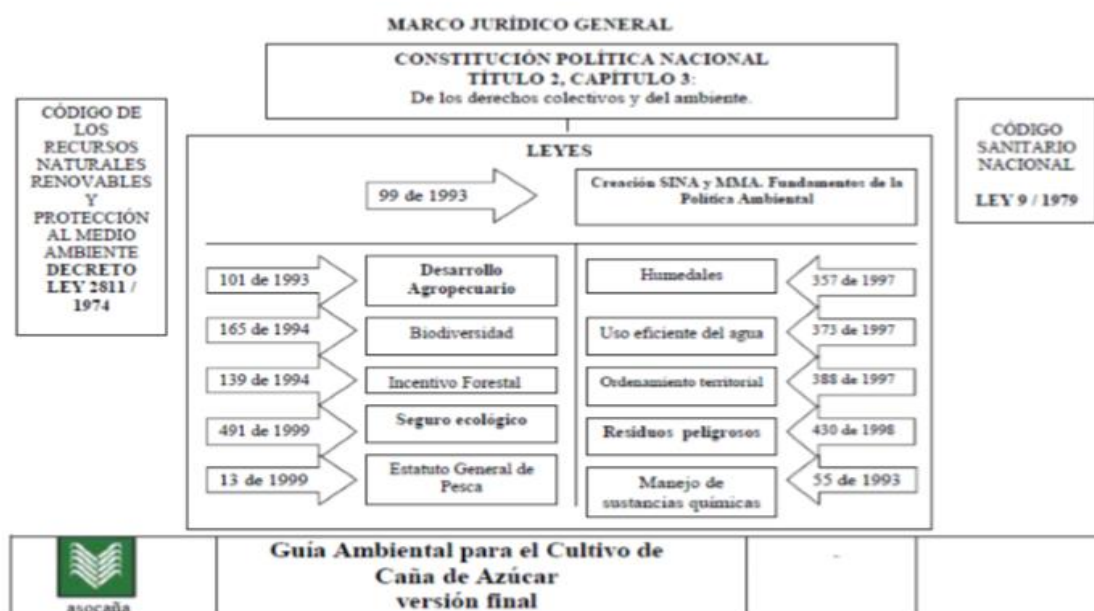
### **1.3.2 Legislación para el sector azucarero.**

Esta legislación se encuentra enmarcada en tres grandes bloques:

**Constitución Política Nacional de Colombia de 1991:** La cual recoge gran parte de los enunciados sobre el manejo y conservación del medio ambiente Las Leyes del Congreso de la República, derechos con fuerza de ley y decretos ley del Gobierno Nacional, constituyen las normas básicas y políticas a partir de las cuales se desarrolla la reglamentación específica o normativa. La competencia para los trámites ambientales ante las autoridades competentes, las cuales regulan y establecen requerimientos específicos para la ejecución de proyectos agrícolas. La Constitución, establece un conjunto importante de derechos y deberes del Estado, las instituciones y los particulares, en materia ambiental, enmarcado en los principios del desarrollo sostenible. Este mandato constitucional, propició así mismo la expedición de la Ley 99 de 1993, que creo el Sistema Nacional Ambiental y el Ministerio del Medio Ambiente(16).

**Aprobación del Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (1974):** Se dio inicio a la gestión ambiental en el país en cabeza del Inderena. Posteriormente, con el Código Sanitario Nacional aprobado en 1978, se establecieron los lineamientos generales en materia de regulación de la calidad del agua y el aire, así como en el manejo de los residuos sólidos(16).

**El Sistema Nacional Ambiental (SINA):** Representa un conjunto de orientaciones, normas, actividades, recursos, programas e instituciones que permiten la puesta en marcha de los principios generares ambientales. Del SINA no forman parte solamente las autoridades ambientales como las corporaciones autónomas regionales o los DAMAS, sino también todas aquellas instituciones que de manera directa o indirecta se relacionan con la gestión ambiental(16).



**FIG 1.** Representación del Marco Jurídico Legal por ASOCAÑA. **Tomado de:** Erazo (2014) **Fuente:** ASOCAÑA (Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia)(16).

## 1.4 Soluciones.

Los desechos agroindustriales provenientes de los ingenios azucareros como son bagazo, cachazas, vinazas, aceites, grasas, barbojos (Cogollos, Vainas, Hojas y Trozos de cañas) y cenizas de la combustión del bagazo son un problema difícil de manejar debido a la gran cantidad de residuos generados en el proceso. Una alternativa es la de darle una revalorización en cuanto a tratamiento y uso adecuado con la ayuda de tecnologías y aporte de microorganismos para que este proceso sea nuevamente aprovechable en las actividades del ser humano. Los procesos de descomposición de residuos dependen entonces de diferentes factores internos y externos entre los cuales están las Condiciones climáticas y metereológicas del sitio, Propiedades físico-químicas de los residuos, Tecnología aplicada y la edad(12). El descubrimiento de los microorganismos como acelerantes del proceso de

desintegración que ayuda al incremento de los minerales contenidos en los desechos orgánicos, estos no afectan al medio ambiente, consumen las sustancias que causan la putrefacción, malos olores y enfermedades(5).

El compostaje es una alternativa a la problemática de contaminación de los desechos orgánicos que se generan en la industria del azúcar pero se manejan desconociendo la dinámica microbiana presente en el proceso. En su manejo, se desconocen los microorganismos responsables de la degradación de los desechos orgánicos y por ello los factores físico-químicos que favorecen su actividad. El éxito de un proceso de compostaje, dependerá entonces de aplicar los conocimientos de microbiología, manejando la pila de compost como un medio de cultivo(6). El estudio de los microorganismos resulta muy complejo, tanto por su extrema pequeñez como su gran variedad de tipos en la mayoría de las poblaciones naturales bajo condiciones controladas pueden abastecer importantes cantidades de materia orgánica a bajos costos para mejorar la productividad del suelo, la descomposición de estos residuos ocurre bajo condiciones de humedad y temperatura óptimos(7). La biodiversidad Microbiana del compost es dependiente de la naturaleza y composición predominante de sustancias orgánicas usadas en el material inicial y como este es un proceso microbiológico se debe intentar controlar las variables que intervienen en el desarrollo de estos microorganismos, así como grupos y consorcios microbianos que se encuentran dentro de las diferentes etapas del proceso afectando no solo la velocidad de descomposición sino también la calidad del producto terminado y minimizando además los riesgos de contaminación ambiental(8, 17).

### **1.5 ¿Qué es Compost?**

Según la GTC 86:2003, se define al compostaje como un proceso biológico controlado que permite la degradación y estabilización de la materia orgánica por la acción de microorganismos y por medio del cual se obtiene abono(15). El compostaje ha obtenido múltiples definiciones por diversos autores citados por Hurtado, 2014 entre estos enunciados se habla de que el compost “es una basura vegetal o animal bien descompuesta, siendo la materia orgánica la acondicionadora ideal del suelo y además la que está al alcance de todo agricultor”, otros posteriormente se refirieron a la mezcla de dos componentes desiguales por su resistencia a la descomposición microbiana; posteriormente la FAO (1991) planteó que es un producto estable y saneado resultado de la degradación de los materiales orgánicos, por una población mixta de microorganismos en un ambiente cálido, húmedo y aireado y finalmente concluye Hurtado, 2014 citando a Crespo (1997) y Leal y Madrid (1998) los cuales estimaron que es obtenido por proceso aeróbico y biológico de degradación en condiciones controladas y por la interacción de bacterias, hongos y numerosos insectos. El compostaje es una forma importante de reciclar elementos orgánicos residuales de la agricultura. El compostaje maduro mejora la estructura del suelo, lo que significa que va a poder trabajarse más fácilmente y tendrá una mejor aireación. En las últimas décadas se ha estado promoviendo una filosofía, el uso de la agricultura orgánica y por tanto, la producción de alimentos no contaminados(5).

Una de las principales tecnologías lo es el uso de compostas que el propio productor roductor puede elaborar en su unidad de producción, utilizando los materiales de que dispone localmente. Ello le permitirá tener un mejor manejo y conservación de su suelo,

recurso principal de cualquier sistema de producción agropecuaria y forestal. El compostaje es un proceso aeróbico de descomposición de la materia orgánica, llevado a cabo por una amplia gama de poblaciones de bacterias, hongos y actinomicetos varios tipos de microorganismos presentes en el compostaje como los hongos, bacterias fototróficas, levaduras, bacterias productoras de ácido láctico y hongos de fermentación(4). Los microorganismos participan en muchos procesos microbiológicos y bioquímicos ligados a la transformación de la materia orgánica que son usados para el crecimiento celular ya que se ha estimado que la materia orgánica contiene más del 50% de carbono que sirve como fuente de energía para la población microbiana encargada de descomponer los residuos(18).

### **1.5.1 Antecedentes para orientar el problema (Parámetros de seguimiento).**

Jeris *et al.* (1973) citado por Bueno *et al.*(19) en su capítulo Factores que afectan el proceso de Compostaje, habla sobre las variables más importantes que afectan a los sistemas de compostaje pueden ser clasificados en dos tipos de parámetros en los que hay que establecer un control: parámetros de seguimiento (aquellos que han de ser medidos, seguidos durante todo el proceso y adecuados, en caso de ser necesario, para que sus valores se encuentren en los intervalos considerados correctos para cada fase del proceso, además Madejón *et al.*, 2001 citado por Bueno *et al.*, dentro del mismo capítulo destaca que los parámetros relativos a la naturaleza del sustrato (aquellos que han de ser medidos y adecuados a sus valores correctos fundamentalmente al inicio del proceso) encontrándose los siguientes:

**Temperatura:** Según Bueno *et al.*(19) dentro de los factores que afectan el compostaje se encuentra la temperatura como primer indicador la cual al disponerse el material que se va a comportar en pilas, en un reactor, etc., si las condiciones son las adecuadas, comienza la actividad microbiana. Inicialmente todo el material está a la misma temperatura, pero al crecer los microorganismos se genera calor aumentando la temperatura, también menciona que según Liang *et al.* (2003) y Miyatake *et al.* (2006) el más claro de la actividad microbiana es el incremento de la temperatura de la masa que está compostando, por lo que la temperatura ha sido considerada tradicionalmente como una variable fundamental en el control del compostaje. La evolución de la temperatura representa muy bien el proceso de compostaje, pues se ha comprobado que pequeñas variaciones de temperatura afectan más a la actividad microbiana que pequeños cambios de la humedad, pH o C/N. Por la evolución de la temperatura se puede juzgar la eficiencia y el grado de estabilización a que ha llegado el proceso, ya que existe una relación directa entre la temperatura y la magnitud de la degradación de la materia orgánica. Asimismo, existe una relación directa entre la degradación y el tiempo durante el cual la temperatura ha sido alta. A veces la temperatura puede llegar a ser tan alta que inhibe el crecimiento de los propios microorganismos, conociéndose este fenómeno como suicidio microbiano(19).

Se observan tres fases en el proceso de descomposición aeróbica: fase mesófila inicial ( $T < 45^{\circ}\text{C}$ ), al final de la cual se producen ácidos orgánicos; fase termófila ( $T > 45^{\circ}\text{C}$ ); y fase mesófila final, considerándose finalizado el proceso cuando se alcanza de nuevo la temperatura inicial. Dentro de su documento Bueno *et al.* (19) añade además que según Suler *et al.* (1977) Cada especie de microorganismo tiene un intervalo de temperatura

óptima en el que su actividad es mayor y más efectiva: 15-40 °C para los microorganismos mesófilos y 40-70 °C para los termófilos. Citando también al autor Ekinci *et al.* (2004) añade que los microorganismos que resulten beneficiados a una temperatura concreta son los que principalmente descompondrán la materia orgánica del residuo, produciéndose un desprendimiento de calor. Este calor provoca una variación de la temperatura de la pila que dependerá de la adecuación de los demás factores a los intervalos óptimos, del tamaño de la pila (el calor generado es proporcional al volumen o masa de la pila, pero la pérdida es proporcional a la superficie), de las condiciones ambientales y del tipo de adición de aire a la pila, ya sea con volteos o con aire a presión(19).

#### **1.5.1.1 Temperatura dentro del proceso de compostaje y su relación con la microbiota.**

Se sabe que el proceso de compostaje pasa por 4 fases que son:

**FASE MESÓFILA (10 °C – 40 °C):** Esta es la primera fase del compostaje en la cual predominan microorganismos mesófilos, específicamente bacterias y hongos que pueden crecer y proliferarse a temperatura ambiente o a temperaturas menores a los 40° C. Algunos microorganismos patógenos pueden ser encontrados en esta fase. Al iniciar la elevación de la temperatura el pH empieza a decrecer desde un valor neutro hasta 5, a causa de la descomposición de lípidos y glúcidos en ácidos pirúvicos y de proteínas en aminoácidos. En este punto, la relación C/N sale a relucir pues el carbono aportará la energía y el nitrógeno ayudará con la síntesis de nuevas moléculas. Aquí se produce la acidificación de la materia y la degradación de las fracciones de carbono débiles. En resumen un aumento de temperatura debido a la intensidad bacteriana presente que actúa con los compuestos orgánicos que fácilmente son biodegradables(12).

**FASE TERMÓFILA (40 °C – 75 °C):** El predominio de las bacterias termófilas y hongos es característico de esta etapa, en la cual las temperaturas son mayores a los 40° C. En esta etapa se alcanzan las temperaturas más altas y es aquí donde se da la autoesterilización del sustrato por la alta producción de CO<sub>2</sub> por parte de los microorganismos presentes difundiéndolo desde el núcleo hasta la corteza haciendo entonces que mueran los patógenos, las esporas, larvas de insectos y demás materia que no es deseable en el producto final. Los principales microorganismos que se pueden encontrar son actinomicetos como *Nocardia sp.* y *Streptomyces sp.*(9) Esto es cuando la pila de compost alcanza temperaturas que mantienen sobre los 60°C debido a la actividad de los microorganismos capaces de digerir las más complejas e insolubles moléculas de materia orgánica como proteínas, grasas y carbohidratos(16).

**FASE DE ENFRIAMIENTO Y MADURACIÓN:** En estas etapas la temperatura presenta intervalos menores a los 75° C hasta regularse a la temperatura ambiente de la zona donde se llevó a cabo el proceso, además, tras agotarse los nutrientes y escasear la energía, los microorganismos termófilos empiezan a desaparecer. Sin embargo, tras alcanzar la temperatura ambiente los microorganismos mesófilos aparecen una vez más para contribuir con el proceso final o maduración del compost. Una vez que se han cumplido los 90 días y el compost se ha enfriado por completo, puede considerarse que el compost está finalmente listo, aunque en ocasiones el período puede extenderse hasta los 120 días, todo dependerá de la aireación, el volteo y la humedad(12). En conclusión es

cuando las moléculas de materia orgánica son fácilmente biodegradables llevando así disminución de la actividad microbiana y la temperatura posteriormente llegando a la fase final la cual se produce la humificación del compost y se produce a temperatura ambiente. Siendo así la TEMPERATURA el primer factor determinante a controlar si se desea tener un compost libre de microorganismos patógenos, temperaturas aceptables para la higienización entre 55°C para 2 semanas con 5 volteos o 65 °C para una semana con 2 volteos(16).

#### **1.5.1.2 Humedad.**

Bueno *et al.*(19) en su capítulo Factores que afectan el proceso de compostaje añade que siendo el compostaje un proceso biológico de descomposición de la materia orgánica, la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos, ya que es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células y de los productos de deshecho de las reacciones que tienen lugar durante dicho proceso además cita a Haug (1993); Madejón *et al.* (2002) y Jeris *et al.* (1973) añadiendo que estos consideran que la humedad de los materiales es la variable más importante en el compostaje y ha sido calificada como un importante criterio para la optimación del compostaje. Continúa redactando que según Miyatake *et al.* (2006) la humedad de la masa de compostaje debe ser tal que el agua no llegue a ocupar totalmente los poros de dicha masa para que permita la circulación tanto del oxígeno (ya que el proceso debe desarrollarse en condiciones aerobias), como la de otros gases producidos en la reacción. La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%; la actividad biológica decrece mucho cuando la humedad está por debajo del 30%; por encima del 70% el agua desplaza al aire en los espacio libres existentes entre las partículas, reduciendo la transferencia de oxígeno y produciéndose una anaerobiosis. Cuando las condiciones se hacen anaerobias se originan malos olores y disminuye la velocidad del proceso. Finaliza que según Haung (1993) el exceso de humedad puede ser reducido con una mayor aireación y a su vez, con un buen control de la humedad y de la aireación, puede llevarse a cabo el control de la temperatura. Esto es debido a que durante el proceso de compostaje se debe llegar a un equilibrio entre los huecos entre partículas (de tamaño variable) que pueden llenarse de aire o de agua. Por lo tanto, la humedad óptima depende del tipo de residuo; así se ha encontrado que, para la paja de cereales está entre 75 y 85%, para astillas de madera entre 75 y 90% y para residuos sólidos urbano (RSU) entre 50 y 55%(19).

#### **1.5.1.3 pH.**

Según Sudberg *et al.* (2004) citado por Bueno *et al.* (19) el pH tiene una influencia directa en el compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos. En muchos trabajos se usa esta variable para estudiar la evolución del compostaje. Sin embargo, su medida, que se realiza en el laboratorio sobre el extracto acuoso de las muestras tomadas en las pilas, es sólo una aproximación del pH “in situ” Mediante el seguimiento del pH se puede obtener una medida indirecta del control de la aireación de la mezcla, ya que si en algún momento se crean condiciones anaeróbicas se liberan ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH. Este presenta 3 fases:



**FASE MESÓFILA INICIAL** se observa una disminución del pH debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más lábil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. Eventualmente, esta bajada inicial del pH puede ser muy pronunciada si existen condiciones anaeróbicas, pues se formarán aún más cantidad de ácidos orgánicos(19).

**SEGUNDA FASE:** Según Sánchez-Monedero (2001) citado por Bueno *et al.* se produce una progresiva alcalinización del medio, debido a la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas(19).

**TERCERA FASE:** El pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón(19).

Suler *et al.* (1977) citado por Bueno *et al.*(19) añade que estos autores establecieron una relación entre los cambios de pH y la aireación de la mezcla, concluyendo que un compostaje con la aireación adecuada conduce a productos finales con un pH entre 7 y 8; valores más bajos del pH son indicativos de fenómenos anaeróbicos y de que el material aún no está maduro. Posteriormente estos mismos autores estudiaron la relaciones pH - aireación-microorganismos existentes en el proceso, y dedujeron que la degradación orgánica se inhibe a pH bajos, por lo que si el pH se mantiene por encima de 7,5 durante el proceso es síntoma de una buena descomposición.

#### **1.5.1.4 Aireación.**

Bueno *et al.*(19) añaden que según Elkinci *et al.* (2004) para el correcto desarrollo del compostaje es necesario asegurar la presencia de oxígeno, ya que los microorganismos que en él intervienen son aerobios. Las pilas de compostaje presentan porcentajes variables de oxígeno en el aire de sus espacios libres: la parte más externa contiene casi tanto oxígeno como el aire (18-20%); hacia el interior el contenido de oxígeno va disminuyendo, mientras que el de dióxido de carbono va aumentando, hasta el punto de que a una profundidad mayor de 60 cm el contenido de oxígeno puede estar entre 0,5 y 2% además que según Zhu (2006) dice que una aireación insuficiente provoca una sustitución de los microorganismos aerobios por anaerobios, con el consiguiente retardo en la descomposición, la aparición de sulfuro de hidrógeno y la producción de malos olores (Bidlemaier, 1996). El exceso de ventilación podría provocar el enfriamiento de la masa y una alta desecación con la consiguiente reducción de la actividad metabólica de los microorganismos. Finalmente cita a Tomati *et al.* (2001) quienes exponen que durante el proceso de maduración no deben hacerse aportaciones adicionales de oxígeno, ya que una excesiva aireación podría dar lugar a un consumo de los compuestos húmicos formados y a una rápida mineralización de los mismos.

#### **1.5.1.5 Espacio de aire libre.**

Bueno *et al.* (19) en su mismo capítulo resaltan a algunos autores los cuales como Hointink *et al.* (1995) resalta que siendo el compostaje un proceso biológico de descomposición de la materia orgánica, la presencia de agua es imprescindible para satisfacer las necesidades fisiológicas de los microorganismos, ya que el agua es el medio de transporte tanto de las

substancias que sirven de alimento a las células, como de los productos de deshecho de la reacción. La humedad (contenido en agua) de la masa de compostaje debe ser tal que el agua no llegue a ocupar totalmente los poros de dicha masa y permita la circulación tanto del oxígeno (ya que el proceso debe desarrollarse en condiciones aeróbicas), como de otros gases producidos en la reacción.

## **1.5.2 Parámetros alternativos a la naturaleza del sustrato.**

### **1.5.2.1 Tamaño de la partícula.**

Bueno *et al.* (19) reportan que el tamaño inicial de las partículas que componen la masa a compostar es una importante variable para la optimización del proceso, ya que cuanto mayor sea la superficie expuesta al ataque microbiano por unidad de masa, más rápida y completa será la reacción. Por lo tanto, el desmenuzamiento del material facilita el ataque de los microorganismos y aumenta la velocidad del proceso. Se ha descrito en una experiencia con residuos agroindustriales que la velocidad del proceso se duplicaba al moler el material. Citando además a Huag (1993) dice que aunque un pequeño tamaño de partícula provoca una gran superficie de contacto para el ataque microbiano, también se reduce el espacio entre partículas y aumenta las fuerzas de fricción y por ende según Bueno *et al.*, finaliza que esto limita la difusión de oxígeno hacia el interior y de dióxido de carbono hacia el exterior, lo cual restringe la proliferación microbiana y puede dar lugar a un colapso microbiano al ser imposible la aireación por convección natural. Por otra parte, un producto muy fino no es aconsejable por riesgos de compactación. En contexto las dimensiones según los autores señalados por Bueno *et al.* varían entre 1 hasta 5 cm(19).

### **1.5.2.2 Relaciones C/N y C/P.**

Bueno *et al.* toma como base a Jhorar *et al.* para argumentar que un correcto compostaje en el que se aproveche y retenga la mayor parte del C y del N, debe tener la relación C/N del material de partida de una manera proporcional es decir la adecuada. Los microorganismos utilizan generalmente 30 partes de C por cada una de N; por esta razón se considera que el intervalo de C/N teóricamente óptimo para el compostaje de un producto es de 25-35. La relación C/N es un importante factor que influye en la velocidad del proceso y en la pérdida de amonio durante el compostaje; si la relación C/N es mayor que 40 la actividad biológica disminuye y los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono con la consiguiente ralentización del proceso, debido a la deficiente disponibilidad de N para la síntesis proteica de los microorganismos. Para eliminar el exceso de carbono (en forma de anhídrido carbónico) es necesaria la aparición sucesiva de diversas especies microbianas. Al morir estos microorganismos el nitrógeno contenido en su biomasa se recicla y la relación C/N tiende a disminuir. Si el residuo tiene una alta relación C/N, pero la materia orgánica es poco biodegradable, la relación C/N disponible realmente para los microorganismos es menor y el proceso evolucionará rápidamente, pero afectará sólo a una proporción de la masa total. Si la relación C/N es muy baja el compostaje es más rápido pero el exceso de nitrógeno se desprende en forma amoniacal, produciéndose una autorregulación de la relación C/N del proceso(19).

También manifiesta que algunos autores consideran que la relación C/N ideal para un compost totalmente maduro es cercana a 10, similar a la del humus. En la práctica, se suele considerar que un compost es suficientemente estable o maduro cuando  $C/N < 20$  aunque esta es una condición necesaria pero no suficiente. Si los productos que se compostan poseen una relación C/N baja (inferior a 18-19), el compostaje se lleva a cabo con mayor rapidez, pero se desprende como amoníaco el exceso de N, produciéndose una autorregulación de la relación C/N. Estas pérdidas, si bien no afectan negativamente al compostaje, suponen un derroche, porque el N es el nutriente fundamental para los cultivos, así como un problema medioambiental ya que el amoníaco es un gas con un considerable efecto invernadero. Al tener la relación C/N una gran dependencia de la riqueza inicial de N, un valor concreto de C/N no refleja el estado de madurez de un compost, por lo que es más indicado seguir la evolución de C/N del proceso o calcular la diferencia entre los valores iniciales y finales. Finaliza que el fósforo es otro de los nutrientes más relevantes por lo que debe encontrarse en mínimas cantidades así una buena relación entre nutrientes provoca adecuada capacidad para la proliferación microbiana al tener todos los nutrientes principales en unas cantidades óptimas y en la forma más disponible para la síntesis microbiana(19).

## **2. Microorganismos presentes en procesos de compostaje.**

Los procesos de tipo degradatorio requieren la producción y gasto de mucha energía por lo que tras el desarrollo de dos rutas metabólicas los microorganismos degradan las moléculas presentes y obtienen la energía suficiente para llevar a cabo su tarea. No obstante, la determinación de las rutas depende estrictamente de otros factores tales como la zona, la humedad, el aire, la temperatura y el pH siendo estos dos últimos los habilitadores o limitantes dentro del proceso. Una de las rutas metabólicas ofrecidas para la producción de energía es la respiración celular, donde una molécula de glucosa es transformada en dos de ácido pirúvico mediante un proceso denominado glucólisis, aquí se libera solamente el 10% de la energía disponible en la glucosa pues el resto es liberado tras la ruptura de las dos moléculas de ácido pirúvico quedando entonces  $H_2O$  y  $CO_2$  más energía en forma de ATP (Adenosín Trifosfato). La segunda ruta es la fermentación, donde se tiene de igual manera la glucosa como molécula principal y el proceso de glucólisis pero con una variación en el producto que puede ser en vez de  $CO_2$  y  $H_2O$ , alcohol etílico y  $CO_2$  o simplemente ácido láctico más ATP(4, 20).

Dentro de la primera fase del compostaje (Mesófila) aparecen microorganismos aerobios y de carácter patógeno que tras ser sometidos a cambios abruptos de temperatura terminan siendo inactivados, es decir, las células bacterianas de cada uno inician un proceso de lisis tras superar las temperaturas a las que están adaptadas liberando entonces el citoplasma y asesinando finalmente a la bacteria. Algunos de estos microorganismos son *Shigella* sp., *Escherichia coli*, *Morganella* sp., *Pseudomonas* sp., que son inactivadas a partir de los 55° C, luego están otros que soportan temperaturas un poco más altas como *Mycobacterium* que es inactivado a los 65° C(21).

La duración y la calidad del compostaje dependen de la diversidad de microorganismos presentes en el proceso(8). Según Castrillón (2006) (17) dentro de las pilas del compost la

mayor relevancia debe ser otorgada al pH y a la temperatura en cuanto al crecimiento microbiano y aunque podría pensarse que el tamaño de la pila también influye se ha demostrado que no es así; teniendo en cuenta la temperatura es que se han distribuido las fases del compost demostrando también que entre cada fase la variación de la microbiota presente es muy grande. Básicamente, en un compost se pueden encontrar virus, hongos, bacterias y actinomicetos que van siendo erradicados tras el incremento de las temperaturas, no obstante, entre cada lapso actúan microorganismos que soportan las abruptas variaciones que pueden darse entre estos factores. Además de los microorganismos patógenos y beneficiosos, al ser el compost un tipo de ecosistema se encuentran también algunos que presentan actividad antagónica generando olores y demás inconvenientes que pueden alterar la calidad del producto final. Al incrementarse la temperatura las actividades metabólicas se aceleran provocando entonces que se genere más calor hasta llegar al punto en el que esta se convierte en un factor deletéreo, es decir, mortífero para algunos de los microorganismos allí presentes(22).

Dependiendo de las variaciones de temperatura, las reacciones térmicas se agrupan en cuatro fases: Mesófila, termófila, enfriamiento y maduración, pero a su vez también podrían ser agrupadas en dos fases globales según la actividad microbiana y los sustratos disponibles. Esas fases globales podrían denominarse como fase bio-oxidativa o de crecimiento activo de los microorganismos, en donde gran cantidad de nutrientes se encontrarían disponibles; y fase de maduración, en la que la actividad microbiana ya es menor y los nutrientes se encuentran limitados. Sin embargo, la fase bio-oxidativa debería estar dividida en fase mesófila y termófila pues se activarían tras el volteo y concluirían tras la nueva baja en la temperatura o el decrecimiento del calor. En la fase mesófila pueden encontrarse bacterias Gram-, proteobacterias (*Pseudomonas*), Gram+, *Bacillus*, *Lactobacillus*, Actinomicetos; hongos Ascomycota (*Penicillium*, *Aspergillus*) y Zygomycota (*Mucor*). Tras alcanzar temperaturas altas por encima de los 70° C, se inicia la fase termófila, en donde sólo aparecen los microorganismos que están acostumbrados a este tipo de temperaturas como los generadores de esporas *Bacillus*, *Thermus* y actinomicetos tales como *Streptomyces* y *Nocardia*. Tras agotarse los nutrientes y escasear la energía, los microorganismos termófilos empiezan a desaparecer y reaparecen algunos de los microorganismos que estuvieron presentes en la fase inicial del proceso, como las bacterias Gram+, algunos actinomicetos, reaparecen los hongos Ascomycota y aparecen los Basidiomycota, protozoos, nematodos y Estramenopilos. En la última fase que es la de maduración, predominan bacterias Gram-, actinomicetos, hongos Ascomycota, Zygomycota, Oomycota, algas y nematodos(9, 12, 22).

## **2.1 Dinámica de los microorganismos presentes en el compost.**

Petric y Mustafic (2013) (10) realizaron un análisis acerca de los modelos predictivos y aproximaciones empíricas a lo que realmente pasa en un proceso de descomposición de materia orgánica; además, proporcionaron algunos elementos que sirven para evaluar la cinética microbiana, los balances de los elementos más sobresalientes como niveles de O<sub>2</sub>, C, N y la cantidad de calor generado según el tiempo.

Por otro lado, Pepe *et al.* (2013) (23) reiteran el hecho de que los microorganismos desempeñan un papel clave en este tipo de procesos y que la aparición de algunos puede ser empleada como indicador de la madurez del compost. De manera específica, este trabajo se inclinó más por la parte de los microorganismos fijadores de Nitrógeno como una opción para el mejoramiento de los suelos a través del compost obtenido de residuos agro-industriales. No obstante, mediante la metodología empleada dejaron ver un poco la interacción de ciertos microorganismos con el ambiente propiciado por el sustrato y confirmaron que algunos de estos fijadores son de vida libre. También clasificaron la microflora presente en grupos funcionales como fijadores de Nitrógeno anaerobios y aerobios, reductores de nitratos, amonificantes, proteolíticos y amilolíticos. De igual manera identificaron si las bacterias eran nativas del suelo o eran atribuidas tras el proceso de compost mediante pruebas de análisis e identificación a nivel molecular a través de la amplificación del ADN ribosomal y secuenciación de los genes.

Sánchez (2009) (6) realizó un estudio similar en donde caracterizó los microorganismos presentes en el compostaje a partir de residuos de caña de azúcar, donde procedió a la identificación macroscópica y microscópica de cada una de las colonias que crecieron en las placas Petri realizando algunas tinciones de Gram. Del mismo modo, fue un poco más allá y evaluó la calidad del compost a nivel biológico por medio de una prueba de germinación a 90 días en donde puso a germinar algunas semillas de hortalizas relacionando el porcentaje de germinación con la longitud obtenida en las raíces en un sustrato testigo y otro con compost.

### **3. Métodos para evaluar la dinámica de MOs en procesos de compostaje.**

Las mejores metodologías planteadas alrededor del tema surgen desde lo más básico hasta lo más complejo que es el estudio molecular de cada cepa de microorganismos (Bacterias, hongos, actinomicetos) pero como todos los estudios se debe partir de una identificación fenotípica y para ello se deben realizar varias fases.

#### **3.1 Muestreo del compost.**

En las ciencias relacionadas con la biología, la mayoría de los análisis son de carácter cuantitativo, es decir que están estrechamente relacionadas con la necesidad de proporcionar datos numéricos. Para proporcionar este tipo de datos, existen varios métodos de muestreo de los cuales siempre se toma el que se adapte más al estudio y esto dependerá entonces de la población de análisis, el objetivo y del parámetro que se desee estimar. Para la realización de muestreos a gran escala, es decir, donde hay demasiadas muestras y estas no pueden ser llevadas por completo al laboratorio, por lo general se emplean muestreos al azar. Un muestreo al azar es aquel en el cual todos los ítems de la población tienen la misma probabilidad de ser muestreados. Si los ítems (individuos, unidades muestrales, etc.) de una población de tamaño  $n$  pueden numerarse desde 1 hasta  $n$ , una forma de llevar a cabo un muestreo aleatorio simple consiste en seleccionar  $n$  de estos números de manera aleatoria (por ejemplo utilizando una tabla de números al azar). Si se está trabajando con muestreos espaciales (la unidad muestral no es un individuo sino un espacio) se puede dividir el área en grillas y seleccionar las casillas a muestrear de manera aleatoria(24).

En este caso y siguiendo el protocolo de caracterización citado por Sánchez (2009)(6), la adquisición de muestras al azar es el primer paso, para el cultivo bacteriano y la identificación de la flora microbiana que existe en este ecosistema específico; con 2 kg de cada pila de compost seleccionada se tendrá lo suficiente, cada pila deberá ser irrumpida por tres secciones, la primera que es la capa superficial (fase mesófila), la segunda que es en la mitad de la pila (fase termófila) y la tercera que es en la base (fase termófila), cada muestra deberá ponerse en bolsas herméticamente selladas y estériles. A pesar de que la metodología de muestreo será al azar, habrá un factor a tener en cuenta y es el grado de maduración de la pila de compost, pues se necesitarán resultados de como mínimo tres pilas que oscilen entre los 0, 60 y 90 días como equivalentes de la fase inicial, la fase exponencial y la fase final donde se supone que el compost estará maduro. Para la verificación de que se obtienen resultados verídicos el proceso debe realizarse por triplicado o sea que se necesitará repetir las muestras por tres veces quedando entonces tres muestras de 0 días, tres de 60 y tres de 90 días respectivamente.

### **3.2 Análisis Microbiológico.**

Una vez que la muestra ha arribado al laboratorio, se debe proceder con las tomas de pH y registrar la temperatura de llegada de la muestra. La implementación de métodos de conteo para mesófilos es primordial, para ello se deben realizar diluciones  $10^9$  en agua peptona, posteriormente se deben sembrar en agar Plate Count mediante dos métodos, uno de siembra por profundidad y el otro por siembra masiva. La incubación debe ser a 26° C, 37° C y 58° C durante 24 horas, después de esas 24 horas debe procederse con el conteo de UFC (Unidades Formadoras de Colonias), según protocolo propuesto por Castrillón (2006)(17).

Para el conteo de hongos y levaduras, se debe realizar la siembra de la dilución  $10^9$  en agar OGYE (Oxitetraciclina, gentamicina y extracto de levadura). El período de incubación deberá ser de 7 días a temperatura ambiente y en oscuridad total, pasados esos 7 días debe realizarse el conteo UFC, según el protocolo de Castrillón (2006) (11). Para la identificación de bacterias y hongos, se toman muestras de los cultivos realizados para así poder realizar el extendido en portaobjetos para la tinción de Gram en bacterias y tinción con azul de lactofenol para hongos. Las pruebas TSI (Agar Triple Azúcar Hierro), LIA (Agar Hierro Lisina), Citrato Simmons, Prueba de Indol (Caldo Triptona), Prueba Urea (Agar Urea), Prueba de Voges-Proskauer, Rojo Metilo, Prueba de Oxidasa y Catalasa, pueden ser empleadas como confirmatorias(17).

### **PROCEDIMIENTO:**

Según la metodología de Benavidez (2010)(25) en cuanto al análisis microbiológico para el procesamiento se mezcla y homogeniza la muestra, se prepara una solución madre tomando 10mL de muestra y se suspende en 90mL de agua destilada estéril, agitando vigorosamente para lograr homogenización completa. Posteriormente se realizan diluciones en base 10, para esto se emplean tubos cada uno con 9mL de agua destilada estéril, al primer tubo se le adiciona 1mL de la solución madre, quedando de esta manera preparada la dilución de 10-1, luego, se transfiere del primer tubo al siguiente 1mL y así sucesivamente hasta alcanzar la dilución de 10-10. En cuanto a aerobios mesófilos se trabajan diluciones establecidas en

ensayos preliminares para determinar la presencia o ausencia de los microorganismos a evaluar. A partir de las diluciones 10-1, 10-2, 10-3 y 10-4 se toma 1mL de cada una, se siembra en Agar Plate Count por duplicado, en profundidad, se incuba a 37°C por 24 - 48 h y se realiza el recuento de unidades formadoras de colonia (UFC)(25).

Para el procedimiento en cuanto a la identificación de los microorganismos se toma el procedimiento de acuerdo al manual de prácticas para microbiología industrial de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (2011)(26) así:

1. Se coloca en una gradilla un juego de pruebas bioquímicas por cada colonia que se desee identificar, iniciando la serie con el tubo conteniendo el medio de citrato.
2. Posteriormente se toma parte de una colonia aislada con el asa circular del microorganismo que se desee identificar y estriar en el pico de flauta del tubo conteniendo el medio de cultivo de citrato (no puncionar).
3. A esto se le toma una porción de la misma colonia con un asa recta y puncionar el medio de cultivo hasta una profundidad máxima de  $\frac{3}{4}$  y posteriormente estriar el pico de flauta en las pruebas de TSI, LIA, y Urea.
4. Consecuentemente se toma una porción de la misma colonia con un asa recta y puncionar el medio de cultivo hasta una profundidad máxima de  $\frac{3}{4}$  en las pruebas de SIM.
5. Se toma una porción de la misma colonia con un asa recta o circular e inocular el caldo de cultivo de la prueba de Voges Proskauer.
6. Se lleva a incubar a 35 °C durante 24 hr.
7. Tomando una porción de la misma colonia y extenderla sobre un portaobjetos. Agregar unas gotas de peróxido de hidrógeno y observar.
8. Con un hisopo estéril se toma una porción de la misma colonia y extenderla sobre un trozo de papel filtro previamente humedecido con el reactivo para la prueba de la oxidasa y observar.
9. Después de la incubación realizar las siguientes pruebas:

Se le adiciona al tubo con medio SIM 5 gotas del reactivo de Kovac's para determinar la producción de indol; posteriormente se observa y registra si hubo cambios o no. Del caldo de cultivo Voges Proskauer se toma la mitad en un tubo de ensayo para la determinación correspondiente, y el resto volver a incubar a 35 °C por 24 horas más, agregándole 3 gotas del reactivo VP (Voges Proskauer). Se espera de 10 a 15 minutos para permitir el desarrollo del color y se registran las observaciones.

Los resultados pueden ser registrados en una tabla como la siguiente:

**TABLA 3.** Cuadro para la anotación de los resultados obtenidos tras cada una de las pruebas bioquímicas. ADAPTADO DE: Manual de prácticas para microbiología industrial de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (2011)

PRUEBA BIOQUÍMICA	CARACTERÍSTICAS COLONIA 1	CARACTERÍSTICAS COLONIA 2	CARACTERÍSTICAS COLONIA 3
TSI			
LIA			
UREA			
SIM			
VOGES-PROSKAUER			
CITRATO			
INDOL			
ROJO DE METILO			
CATALASA			
OXIDASA			

El manual señala que las pruebas bioquímicas evalúan las propiedades metabólicas de un microorganismo aislado, las cuales son únicas para cada especie. La combinación de pruebas bioquímicas puede utilizarse para determinar el patrón bioquímico del microorganismo aislado, esto hace posible la identificación del mismo utilizando un esquema de identificación(25).

La guía de trabajos prácticos para métodos de tinción y medios de cultivo señala el fundamento de algunas pruebas bioquímicas para la identificación microbiológica(27):

**TSI (TRIPLE AZÚCAR HIERRO):** Es un medio que se coloca en tubos y se solidifica en posición inclinada. Se observa la capacidad del microorganismo para fermentar glucosa, lactosa, sacarosa. Las bacterias que fermentan los azúcares como son lactosa o sacarosa acidifican el medio donde se puede ver en la superficie por el viraje al amarilla del indicador de pH rojo de Fenol. El medio en estado alcalino vira al rojo indicador.

**LIA: (LISINA HIERRO AGAR):** Se utiliza para demostración simultánea de lisina descarboxilasa y producción de ácido sulfhídrico. Esta lisina se descarboxila por microorganismos LD+ transformándola en cadaverina virando el medio a color violeta del indicador de pH púrpura de bromocresol; el medio solo debe ser usado para organismos fermentadores de glucosa. Los microorganismos LD- pero fermentadores de glucosa producen viraje del medio a amarillo, la producción manifiesta color negro por la formación de sulfuro de hierro.

**CITRATO DE SIMMONS AGAR:** Uso para identificar algunos hongos basados en el citrato como única fuente de carbono produciendo alcalinización del medio de cultivo manifestándose por un viraje al azul oscuro del indicador de pH azul de Bromotimol e incubándose a 37°C de 24 a 48 horas.

**UREA CALDO:** Solo crecen microorganismos que su única fuente de carbono es la urea produciendo viraje del medio a rojo y turbidez del mismo.



## PARA EL CONTEO DE UFC/g

$$\frac{\text{No. De colonias por placa} \times \text{factor de dilución}}{\text{ml de la muestra sembrada.}}$$

**En cuanto al pH:** Se toma el protocolo de Gordillo, (2011)(28) en el cual pesaron 10 g de muestra tamizada y se mezclaron con 50 ml de agua destilada (relación 1:5 p:v) manteniendo en agitación. Posteriormente se midió el pH una vez estabilizada la lectura.



**FIG 1.** Condensado de un protocolo de muestra y siembra microbiológica. TOMADO DE: Caracterización Microbiológica de Lixiviados de Materias Primas para la Fabricación de un Compostaje de Material Ruminal.

### 3.3 Análisis de la dinámica.

Tras la cuantificación de los microorganismos presentes, puede procederse con la realización de un análisis poblacional inicial que servirá para ver la dinámica de los microorganismos que participan en cada una de las fases con respecto a una de las variables: La temperatura. Para ello, las fórmulas de análisis poblacional empleadas por Petric y Mustafic (10) pueden ser usadas. No obstante, el desarrollo de este tipo de análisis requiere más que una simple caracterización microbiana entonces para ello se necesita del

análisis minucioso de cada uno de los factores primordiales y alterables dentro de la muestra. La evaluación de la dinámica como la propuesta por Pepe (23) implica la toma de muestras de los días 13, 23, 68 y 113, además del volteo de las pilas cada 5-7 días para de ese modo promover la oxidación de los componentes; de la misma manera la toma constante de las temperaturas también debe ser monitoreada regularmente mediante sensores de temperatura ubicados a una profundidad de 30-40 cm directamente dentro del núcleo de la pila y a 5 -10 cm en los lados opuestos de las mismas. La equivalencia entre C/N puede ser analizada a partir de la concentración de carbono hallada y el valor de nitrógeno para esta mezcla. Para los cálculos de esta, siempre se asume que la relación orgánica C/N es de 50:1 entonces mediante una simple regla de tres se establecen unos valores iniciales que serán constatados paso a paso(29):

1. Determinar la relación C/N de la materia orgánica, por lo general se asume que es de 50:1.
2. Determinar el peso total de la mezcla, con una simple sumatoria de los kg de cada compuesto agregado, basta.
3. Determinar el porcentaje de participación en la mezcla. Con una regla de tres básica puede realizarse.
4. Dividir cada uno de los porcentajes obtenidos por 100.
5. Multiplicar los resultados de la división por la relación C/N anteriormente determinada (Casi siempre es 50).
6. Se suman los valores obtenidos en el quinto paso, el resultado de la suma corresponde a la proporción del carbono y en el caso del nitrógeno siempre se toma como 1.

En el documento elaborado por Petric y Mustafic, se implementa un modelo matemático para describir el crecimiento microbiano en base a la dependencia del contenido de humedad, el oxígeno y la temperatura; dando como resultado o base la siguiente fórmula:

#### **Fórmula para evaluar cinética.**

$$\frac{dX_i}{dt} = \mu_i \cdot X_i - k_{d,i} \cdot X_i$$

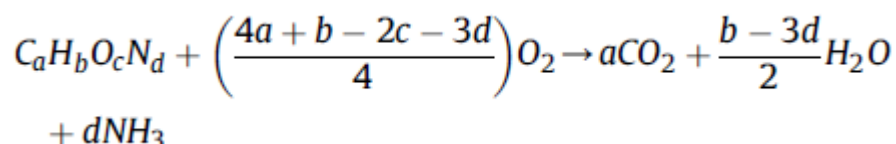
Donde  $X_i$  es la masa de la población microbiana expresada en kg,  $\mu_i$  tasa de crecimiento específica microbiana,  $k_{d,i}$  es la tasa de mortalidad específica microbiana.

Para el análisis del balance masa – oxígeno, establecieron la siguiente ecuación:

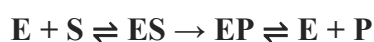
$$\frac{dO_2}{dt} = \sum_{i=1}^n \left( -Y_{O_2/S_i} \cdot \frac{dS_i}{dt} \right) + \frac{F}{V} \cdot (O_{2,in} - O_{2,out})$$

Donde  $Y_{O_2/S_i}$  es el coeficiente de rendimiento hallado tras dividir los kg  $O_2$  producido / kg sustrato consumido,  $F$  es la tasa de flujo del aire,  $O_{2,in}$  es la entrada en masa de oxígeno y  $O_{2,out}$  es la salida en masa de oxígeno.

Además, dijeron también que partiendo del conocimiento de la composición química elemental conocida del sustrato, la degradación de la parte orgánica del sustrato podía ser encontrada mediante la siguiente ecuación:



Donde a,b,c y d son los índices que describen la fracción molar de carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno respectivamente. Los coeficiente estequiométricos, son hallados mediante la fórmula que se conoce como la fórmula molecular del sustrato.



Donde E = enzima, S = sustrato(s), P = producto(s)

## PROCEDIMIENTO

Para hacer evaluación microbiana se puede utilizar el procedimiento propuesto por Romero *et al.* (2015)(30) en su estudio “Dinámica microbiana en el compostaje de cachaza reactivada con gallinaza” en el cual cita a Cunhaqueda *et al.* (2007) y Velasco *et al.* (2011) que dicen que las dificultades en las cuales se puede realizar compostas dificulta esclarecer del todo, cómo diferentes factores tanto bióticos como abióticos afectan la actividad de las poblaciones microbianas. Además citando a Vargas *et al.* (2005) los cuales expresan que a pesar de las controversias sigue siendo importante comprender como y que factores regulan la actividad de las poblaciones microbianas en el proceso de compostaje; ya que de estos se puede proveer información del como evaluar el proceso, la calidad, la velocidad de degradación y la madurez del producto y es allí en donde se vuelve de suma importancia la dinámica con relación al carbono: nitrógeno en relación a la actividad microbiana. También dentro de su metodología referencia el método implementado para la cuantificación microbiana utilizando un medidor portátil marca Spectrum Technologies, Inc.modelo 7001 con precisión de  $\pm 50$  ppm y resolución de  $\pm 1$  ppm. Para esto los datos microbiológicos se transforman a base logarítmica ( $\log_{10}$ ) para su posterior ANOVA (Análisis de varianza) y comparación con medias ( $LD_{0.05}$ ) con el programa estadístico Statical Analysis System (SAS) versión 9.0 (SAS Institute, 2004)(30).

Según Escudero y Arias (2012)(31), una de las grandes influencias con el compostaje es en cuanto a los microorganismos y la relación que se ejerce C/N inicial sobre el proceso en donde a menor relación pero cercana a 35/1 teórico menor duración del compostaje y microbiota más abundante. Añaden además que el material de partida y las condiciones del hábitat inciden en la composta. Otra variable a tener en cuenta es la evolución de  $CO_2$  durante el proceso de compostaje el cual Velasco *et al.* (2004)(32) citando a Alexander (1994) menciona sobre la flora fúngica que esta libera menos  $CO_2$  por unidad de carbono transformado aeróbicamente que los otros grupos microbianos, ya que los hongos son más eficientes en su metabolismo y a mayor eficiencia de los organismos, es menor la cantidad de productos orgánicos y  $CO_2$  liberado. Muestra además en sus resultados que los

materiales carbonados se degradan conforme transcurre el tiempo, dependiendo así de la complejidad estructural. Sin embargo los carbonados simples son los que rompen en primer lugar y sirven como sustratos para los microorganismos incrementando la biomasa microbiana en etapas tempranas, mientras que las posteriores son más complejas y los microorganismos menos abundantes y más específicos. Además el autor expresa que Alexander (1994) menciona que la producción de CO<sub>2</sub> por día, en suelo es en general de 0.005 a 0.05g de CO, kg<sup>-1</sup> de suelo aunque se pueden encontrar casos de 25g de CO, kg<sup>-1</sup>. Dentro del mismo documento se señala también que la humedad del sustrato es muy importante, ya que la actividad microbiana y los proceso de oxidación requieren de disponibilidad de agua, además cita a MacGregor *et al.* (1981) el cual menciona que sobre una pila de 6 m<sup>3</sup> de material y 76% de humedad, a 15 días su humedad decrece hasta un 22% por lo que se vuelve importante suministrarle agua de manera permanente; añadiendo a esto cita al autor Dalzell *et al.* (1991) que menciona sobre como un composteo tradicional necesita humedad de 40 a 65% pero que sin embargo, el porcentaje de humedad varía de acuerdo al tipo de material que se utilice(32).

El mismo autor (Velasco *et al.* (2004)(32)) señala que el pH determina el crecimiento de determinados grupos microbianos. Seguidamente la dinámica en relación con la temperatura que juega un papel fundamental durante el desarrollo del compost así entonces cuando se realizan métodos como el de Velasco *et al.*, (2004) la aireación forzada (AF) muestra en este caso temperaturas termofílicas durante la etapa inicial (15 días) y contrario a esto la aireación manual (AM) muestra esta misma etapa más prolongada, debido a los volteos y mezcla de residuos en mayor o menor grado de descomposición. Para continuar el autor cita a Stentiford *et al.* (1985) que hace énfasis en cuanto a la actividad de los microorganismos, la cual era inhibida fuertemente cuando la temperatura excede 60°C o cuando su intervalo varía entre 45 a 60°C(32). Para Chandler *et al.* (2008)(33) en los diferentes flujos de aire y tiempos de aireación se alcanzan valores de pH y Temperatura adecuados para el desarrollo de microorganismos aerobios encargados de la biodegradación del sustrato; además el contenido de humedad en un rango entre 50 a 70% presenta valores adecuados para su biodegradación. Para el número de hongos y bacterias al final del proceso, indica que los microorganismos presentan condiciones favorables para crecer. En cuanto a relación C:N una disminución del mismo indica que se realiza una biodegradación eficiente; aun cuando niveles de nitrógeno son bajos. Y para finalizar el bioproceso anaeróbico en este caso particular resulto ser menos eficiente cuando se trata de desechos con aireación forzada (AF). El mismo autor señala que la aireación es esencial para el metabolismo y respiración de los microorganismos aeróbicos y para la oxidación de los compuestos orgánicos presentes en el desecho y concluye que la interacción entre los tiempos de aireación y los flujos de aire, no tuvieron un efecto significativo sobre la relación C: N(33).

Finalmente, Pino *et al.* (2005)(34) afirma que con la descomposición aeróbica de la materia orgánica se pierde aproximadamente dos tercios del volumen inicial de residuos, esta pérdida es en forma de CO<sub>2</sub> proveniente de la descomposición de la hemicelulosa y celulosa, por la evaporación del agua producida por los microorganismos y por la energía liberada en forma de calor.

### **3.4 Análisis Estadístico.**

Las variables anteriormente mencionadas, pueden ser sometidas a un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software SAS. En caso de que se presenten diferencias altamente significativas, puede llevarse a cabo la prueba de promedios Duncan. Adicionalmente, se realizará un estudio de correlación para todas las variables al final del ensayo, para estimar cuales de estas variables estaban relacionadas y tenían mayor peso dentro de la variabilidad total del ensayo. Identificando estas variables se podrá determinar cuáles pueden ser las más apropiadas para predecir las cantidades totales de los microorganismos presentes en el compost. Además de estos estudios, puede usarse una prueba t de Student por medio del programa estadístico Statgraphics plus versión 5.1 para comparar los promedios de los recuentos poblacionales de los microorganismos estudiados.

## **PROCEDIMIENTO**

### **Análisis estadístico:**

Para este se toma también como referencia según el artículo “Aproximación de la dinámica poblacional de los microorganismos en diferentes sustratos empleados en el cultivo de rosa (*Rosa* spp. Var. Charlotte) en la Sabana de Bogotá” en el cual añaden que en el análisis estadístico del estudio para la evaluación en laboratorio, específicamente la cuantificación según el caso de bacterias y hongos a las 24 y 48 h después de siembra (hds), estuvo basado en un diseño completamente al azar, con cinco tratamientos (tipo de sustrato) y seis repeticiones por medio para un total de 90 cajas por muestreo. Los datos se sometieron a un análisis de varianza y una prueba de rango múltiple de Tukey ( $P \leq 0,05$ ), utilizando como software de soporte, SAS versión 9.1(35).

Otros procedimientos como el de Gordillo (2011)(28) para analizar los datos obtenidos, se realizaron comparaciones de medias a través del análisis de varianza y pruebas de Fisher y Tukey para las variables de altura, macro y micronutrientes, materia orgánica, relación C/N, humedad y población microbiana; y análisis de correlaciones para las variables macro y micronutrientes, materia orgánica, relación C/N y humedad; además de gráficas en serie temporal para evaluar la evolución en el tiempo de las variables altura y conductividad eléctrica.

## **CONCLUSIONES**

Existe una gran variedad de reportes científicos relacionados con los procesos de compostaje y la importancia que tienen los MOs en tales eventos; sin embargo, son pocos los reportes que estudian la dinámica de los MOs presentes en el proceso de compostaje de subproductos de la caña de azúcar.

A partir de esta revisión, el protocolo más recomendado para evaluar la dinámica de los MOs presentes en el compostaje de subproductos de la caña de azúcar, es el resultado de la

suma de los reportes de los autores Sánchez (2009)(6), Castrillón (2006)(17) y Romero (2015)(9).

## **PRODUCTOS:**

Proyecto de Investigación.

Artículo de Revisión (En evaluación).

## **REFERENCIAS.**

1. Basanta R, García MA, Cervantes JE, Mata H, Bustos G. Sostenibilidad del Reciclaje de Residuos de la Agroindustria Azucarera: Una Revisión. SOMENTA (Sociedad Mexicana de Nutrición y Tecnología de los Alimentos). 2007;5(4):293-305.
2. García HR, Albarracin LC, Toscano A, Santana NJ, Insuasty O. Guía Tecnológica para el Manejo Integral del Sistema Productivo de Caña Panelera. CORPOICA2007.
3. García R, Ríos E, Martínez A, Ramos FR, Cruz JS, Cuevas MC. Uso de Cachaza y Bagazo de Caña de Azúcar en la Remoción de Hidrocarburos en Suelo Contaminado. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 2011:31-9.
4. Filippini MF. Principios del Compostaje en Agroecología y Ambientes Rurales2011. Available from: [http://campus.fca.uncu.edu.ar:8010/pluginfile.php/7818/mod\\_resource/content/0/A](http://campus.fca.uncu.edu.ar:8010/pluginfile.php/7818/mod_resource/content/0/A)
5. Hurtado J. Evaluación del Efecto Acelerador de Microorganismos Transformadores de Materia Orgánica (TMO) en el Proceso de Compostaje de las Deyecciones de Bovinos, Porcinos y Conejos. Manizales - Colombia: Universidad de Manizales; 2014.
6. Sánchez TM. Caracterización Microbiológica del Proceso de Compostaje a partir de Residuos Azucareros. Agronomía Tropical. 2009;59(3):309-16.
7. Naranjo EI. Aplicación de Microorganismos para Acelerar la Transformación de Desechos Orgánicos en Compost. Ambato - Ecuador: Universidad Técnica de Ambato; 2013.
8. Doncean A, Şumălan R, Şumălan R. Comparative study of aerobic microorganisms in compost. JOURNAL of Horticulture, Forestry and Biotechnology. 2011;15(1):29-34.
9. Escobar N, Mora J, Romero NJ. Identificación de Poblaciones Microbianas en Compost de Residuos Orgánicos de Fincas Cafeteras de Cundinamarca. Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural. 2012;16(1):75-88.
10. Petric I, Mustafic N. Dynamic modeling the composting process of the mixture of poultry manure and wheat straw. Journal of environmental management. 2015 Sep 15;161:392-401. PubMed PMID: 26209761.
11. INGENIO RISARALDA SA. Manual de Procedimientos para el Proceso de Compostaje. Planta de Compostaje. 2014.
12. Gordillo FA. Evaluación Comparativa de la Calidad del Compost Producido a partir de Diferentes Combinaciones de Desechos Agroindustriales Azucareros. Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral; 2010.

13. ICIDCA. MANUAL de los derivados de la caña de azúcar: Grupo de Países Latinoamericanos y del Caribe; 1990.
14. Directrices para la Auditoría Ambiental. Principios Generales de Auditoría Ambiental, (1997).
15. ICONTEC. Guía para el Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos NO PELIGROSOS. In: Colombiana GT, editor. Colombia 2006.
16. Erazo J. Identificación de la Planeación Estratégica Financiera de la Inversión de Mitigación del Impacto Medio Ambiental Causado por el Ingenio Azucarero Manuelita, al Recurso Hídrico en el Valle del Cauca. Bogotá-Colombia: Universidad Militar Nueva Granada; 2014.
17. Castrillón O, Bedoya O, Montoya DV. Efecto del pH sobre el Crecimiento de Microorganismos Durante la etapa de Maduración en Pilas Estáticas de Compost. Producción + Limpia. 2006;1(2).
18. Pérez MA, Sánchez R, Palma DJ, Salgado S. Caracterización Química del Compostaje de Residuos de Caña de Azúcar en el Sureste de México. Interciencia. 2011;36(1).
19. Bueno P, Díaz MJ, Cabrera F. Factores que Afectan al Proceso de Compostaje. Sevilla-España: Universidad de Huelva.
20. Biddle JC. Biology: Fermentation and Respiration 1993 05/04/2015]. Available from: <http://search.proquest.com/docview/225912984?accountid=46889>.
21. Muñoz JS. Compostaje en Pescador, Cauca: Tecnología Apropiada para el Manejo de Residuos Orgánicos y su Contribución a la Solución de Problemas Medio Ambientales. Palmira - Valle: Universidad Nacional de Colombia; 2005.
22. Moreno J, Moral R. Compostaje. España 2008.
23. Pepe O, Ventorino V, Blaiotta G. Dynamic of functional microbial groups during mesophilic composting of agro-industrial wastes and free-living (N<sub>2</sub>)-fixing bacteria application. Waste management. 2013 Jul;33(7):1616-25. PubMed PMID: 23647951.
24. Guía de Muestreo de Ecología General [29/11/2015]. Available from: <http://populationecol.tripod.com/muestreo.pdf>.
25. Benavides KA. Caracterización Microbiológica de Lixiviados de Materias Primas para la Fabricación de un Compostaje de Material Ruminal. Manizales- Caldas: Universidad Católica de Manizales; 2010.
26. Santana LE, Poncio Z. Manual de Prácticas Microbiología Industrial. Ciudad Juárez- México: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez; 2011.
27. Guía de Trabajos Prácticos.
28. Gordillo F, Peralta E, Chávez E, Contreras V, Campuzano A, Ruiz O. Producción y Evaluación del Proceso de Compostaje a partir de Desechos Agroindustriales de *Saccharum officinarum* (Caña de Azúcar). RIA. 2011;37(2):140-9.
29. Basaure P. Determinación de Relación C/N en mezclas para composta 2012 [29/11/2015]. Available from: <http://www.manualdelombricultura.com/foro/mensajes/24151.html>.
30. Romero-Yam LA, Almaraz-Suárez JJ, Velasco-Velasco J, Galvis-Spinola A, Gavi-Reyes F. Microbial dynamics during composting of filter cake reactivated with chicken manure. Revista Chapingo Serie Horticultura. 2015;XXI(1):21-31.
31. Escudero A, Arias CA. Los Microorganismos en los Abonos Orgánicos a partir de Podas en la Universidad del Norte, Colombia. Rev Int Contam Ambient. 2012;28(1):67-75.
32. Velasco J, Figueroa B, Ferrera R, Trinidad A, Gallegos J. CO<sub>2</sub> y Dinámica de Poblaciones Microbianas en Composta de Estiércol y Paja con Aireación Terra Latinoamericana. 2004;22(3):307-16.
33. Chandler C, Ferrer J, Mármol Z, Páez G, Ramones E. Efecto de la Aireación en el Compostaje del Bagacillo de la Caña de Azúcar. Multiciencias. 2008;8(1):19-27.

34. Pino P, Varnero MT, Alvarado P. Dinámica del Compostaje de Residuos Vitivinícolas con y sin Incorporación de Guano Broiler. Proyecto Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico - Chile. 2005.
35. Alfonso M, Coca A, Ramírez W, Hoyos L. Aproximación de la Dinámica Poblacional de los Microorganismos en Diferentes Sustratos Empleados en el Cultivo de Rosa (*Rosa* spp. Var. Charlotte) en la Sabana de Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 2008;2(1):98-109.
36. Pacheco F. Evaluación de la Eficacia de la Aplicación de Inóculos Microbiales y de *Eisenia fetida* en el Proceso de Compostaje Doméstico de Desechos Urbanos. Navarra - España: Universidad Pública de Navarra; 2009.
37. Golueke CG. Composting: a study of the process and its principles: Rodale Press; 1973.
38. Bohórquez A. Evaluación de la Calidad del Compost Producido a partir de la Molienda de Caña de Azúcar en la Compañía Riopaila Castilla, Valle del Cauca, Colombia. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2013.
39. García AM, Angulo J, Martínez MM, Gutiérrez V. Effect of Phosphate - Solubilizing Bacteria and Compost on the Nutritional Characteristics of the Oil Palm Crop (*Elais guineensis* Jacq.) in Casanare, Colombia. *Agronomía Colombiana*. 2012;30(2):274-81.
40. Rao N, Grethlein HE, Reddy CA. Effect of C/N Ratio and Moisture Content on the Composting of Poplar Wood. *Biotechnology Letters*. 1995;17(8):889-92.
41. Cooperband L. The Art and Science of Composting a Resource for Farmers and Compost Producers: University of Wisconsin-Madison; 2002.
42. Iglesias E. Aspectos Físicos-Químicos, Bioquímicos y Microbiológicos del Proceso de Compostaje. Evaluación de la Calidad. Salamanca- España: Universitas Miguel Hernández.
43. Norma Técnica Colombiana. Muestreo de Residuos y Suelos para Análisis de Constituyentes Orgánicos Volátiles, Stat. 4711 (1999).
44. Norma Técnica Colombiana. Productos para la Industria Agrícola. Productos Orgánicos Usados como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas o Acondicionadores de Suelo, Stat. 5167 (2011).
45. Rodríguez NC, Toro CA. Estandarización del Tiempo de Incubación y Concentración de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$  y  $\text{KNO}_3$ , para la Prueba del NMP con Bacterias Nitrificantes y Denitrificantes Usando como Matriz Compost. Bogotá- Colombia: Pontificia Universidad Javeriana; 2006.
46. Acosta Y, El Zauahre M, Rodríguez L, Reyes N, Rojas D. Indicadores de Calidad Bioquímica y Estabilidad de la Materia Orgánica Durante el Proceso de Compostaje de Residuos Orgánicos. *Multiciencias*. 2012;12(4):390-9.
47. Zhang X, Zhong Y, Yang S, Zhang W, Xu M, Ma A, et al. Diversity and dynamics of the microbial community on decomposing wheat straw during mushroom compost production. *Bioresource technology*. 2014 Oct;170:183-95. PubMed PMID: 25129234.
48. Bohórquez A, Puentes YJ, Menjivar JC. Evaluación de la Calidad del Compost Producido a partir de Subproductos Agroindustriales de Caña de Azúcar. *Corpoica, Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 2014;15(1):73-81.
49. Melchor GI, García S, Palma D, Lagunes LC, Castelán M, Ruiz O. Vinaza y Composta de Cachaza como Fuente de Nutrientes en Caña de Azúcar en un Gleysol Mólico de Chiapas, México. *Interciencia*. 2008;33(11).
50. Cano MA. Interacción de Microorganismos Benéficos en Plantas: Micorrizas, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp. una Revisión. *Rev UDCA Act & Divulgación Científica*. 2011;14(2):15-31.
51. Vásquez MC, Prada PA, Mondragon MA. Optimización del Proceso de Compostaje de Productos Post-Cosecha (Cereza) del Café con la Aplicación de Microorganismos Nativos. *NOVA-Publicación Científica en Ciencias Biomédicas*. 2010;8(14).
52. Cardinali A, Otto S, Vischetti C, Brown C, Zanin G. Effect of pesticide inoculation, duration of composting, and degradation time on the content of compost fatty acids, quantified using two



methods. *Applied and environmental microbiology*. 2010 Oct;76(19):6600-6. PubMed PMID: 20693445. Pubmed Central PMCID: 2950477.

53. Marti R, Scott A, Tien YC, Murray R, Sabourin L, Zhang Y, et al. Impact of manure fertilization on the abundance of antibiotic-resistant bacteria and frequency of detection of antibiotic resistance genes in soil and on vegetables at harvest. *Applied and environmental microbiology*. 2013 Sep;79(18):5701-9. PubMed PMID: 23851089. Pubmed Central PMCID: 3754188.

54. Yao Z, Wang H, Wu L, Wu J, Brookes PC, Xu J. Interaction between the microbial community and invading *Escherichia coli* O157:H7 in soils from vegetable fields. *Applied and environmental microbiology*. 2014 Jan;80(1):70-6. PubMed PMID: 24123745. Pubmed Central PMCID: 3911026.

55. Maeda K, Toyoda S, Shimojima R, Osada T, Hanajima D, Morioka R, et al. Source of nitrous oxide emissions during the cow manure composting process as revealed by isotopomer analysis of and *amoA* abundance in betaproteobacterial ammonia-oxidizing bacteria. *Applied and environmental microbiology*. 2010 Mar;76(5):1555-62. PubMed PMID: 20048060. Pubmed Central PMCID: 2832385.

56. Singh R, Kim J, Shepherd MW, Jr., Luo F, Jiang X. Determining thermal inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in fresh compost by simulating early phases of the composting process. *Applied and environmental microbiology*. 2011 Jun;77(12):4126-35. PubMed PMID: 21498743. Pubmed Central PMCID: 3131655.

57. Levican A, Collado L, Yustes C, Aguilar C, Figueras MJ. Higher water temperature and incubation under aerobic and microaerobic conditions increase the recovery and diversity of *Arcobacter* spp. from shellfish. *Applied and environmental microbiology*. 2014 Jan;80(1):385-91. PubMed PMID: 24185851. Pubmed Central PMCID: 3911005.

58. Tchobanoglous G, Theissen H, Eliassen R. *Desechos Sólidos: Principios de Ingeniería y Administración*. 1982.

59. Gallego CM. *Influencia de la Ácidez Volátil en el Proceso de Fermentación de la Planta de Alcohol del Ingenio Risaralda S.A.* Pereira-Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira; 2007.

60. Uribe JF, Estrada M, Córdoba S, Hernández LE, Bedoya DM. Evaluación de los Microorganismos Eficaces (E.M) en Producción de Abono Orgánico a partir del Estiércol de Aves de Jaula. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 2001;14(2).

61. Cariello ME, Castañeda L, Riobo I, González J. Inoculante de Microorganismos Endógenos para Acelerar el Proceso Compostaje de Residuos Sólidos Urbanos. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2007;7(3):26-37.

62. Chen KS, Lin YS, Yang SS. Application of Thermotolerant Microorganisms for Biofertilizer Preparation. *J Microbiol Immunol Infect*. 2007;40:462-73.

63. Zúñiga V, Gandini MA. Caracterización Ambiental de las Vinazas de Residuos de Caña de Azúcar Resultantes de la Producción de Etanol. *Dyna*. 2012;177:124-31.

64. Saavedra JF, Vargas OR. Estimación del Impacto Ambiental del Cultivo de Caña de Azúcar Utilizando la Metodología del Análisis del Ciclo de Vida (Acv). Colombia: Universidad de los Andes.

65. Bautista F, Durán MC. Análisis del Beneficio y Riesgo Potenciales de la Aplicación al Suelo de Vinazas Crudas y Tratadas Biológicamente. *Rev Int Contam Ambient*. 1998;14(1):13-9.

66. Rajagopal V, Paramjit SM, Suresh KP, Yogeswar S, Nageshwar RDVK, Avinash N. Significance of vinasses waste management in agriculture and environmental quality- Review. *African Journal of Agricultural Research*. 2014;9(38):2862-73.

67. Marschner P, Crowley D, Yang CH. Development of Specific Rhizosphere Bacterial Communities in Relation to Plant Species, Nutrition and Soil Type. *Plant and Soil*. 2004;261:199-208.

68. ASOCAÑA. Guía Ambiental para el Subsector de Caña de Azúcar, Versión Final. In: Ambiente MdM, editor. Colombia.